

早稲田大学大学院 理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

深礎基礎に埋め込まれた送電用鉄塔脚の
引抜定着耐力に関する研究

Uplift Capacity of Anchor Embedded in Caisson Type
Foundation of Transmission Tower Leg

申 請 者

齋藤	修一
Shuichi	Saito

--

2 0 0 8 年 6 月

送電用鉄塔は 4 本の支柱材（最下節の支柱材を主脚材または脚材とも呼ぶ）と腹材などからなるトラス構造をなしている．鉄塔重量は比較的小さいため，地震時に基礎に伝達される荷重によって基礎形状が決定されるケースは少ない．しかし，鉄塔高さが 30～100m もあり，台風などによる風を鉄塔が受けるため，鉄塔全体に転倒モーメントが生じ，鉄塔の支柱材から基礎（コンクリート躯体）に圧縮荷重や引揚荷重が伝達される．圧縮荷重が作用する構造物は一般的に多く存在するが，送電用鉄塔は基礎に作用する引揚荷重が卓越した構造物としての特徴を有している．鉄塔の規模によって支柱材から基礎に伝達される荷重は異なり，引揚荷重は電圧 66kV の鉄塔で数百 kN，電圧 1000kV の超高压送電線 UHV（Ultra High Voltage）などの大型鉄塔では 20000kN となっている．

基本的な基礎と脚材の定着方式はつぎのとおりである．平野部に建設する場合，脚材を 4 本の杭に支持されたフーチング基礎が適用されることが多い．脚材の定着方法は十字型のアンカーを基礎に埋め込むいかり材定着が適用されている．大型重機の搬入ができない山岳地に建設される場合，小型機械や人力で建設できる深礎基礎が適用されることが多い．脚材を基礎の躯体に直接定着させるため，脚材に節状のリブを取り付けて基礎に埋め込む支圧板定着方式が適用されている．

脚材の定着設計法に関する研究および類似構造物の設計法の検討経緯を示すと以下のとおりである．

鉄塔規模が大きくなると共に基礎に作用する荷重が大きくなり，従来は直接基礎で支持されていたが引揚支持力の大きい杭によって支持されるフーチングを有する形式が採用され始めた．そこで，「送電用鉄塔基礎としての 4 本杭に支持された RC スラブの設計法に関する研究」が実施され，4 本杭支持床板への定着設計法が提案された．

その後，UHV を建設するにあたり，荷重がさらに大きくなったため支持力の大きな基礎が求められた．平野部では杭に支持されたフーチング基礎が，山岳地では深礎基礎が適用されるようになった．そこで，「大型送電用鉄塔基礎への脚材定着手法に関する研究」が行われ，いかり材定着設計法と支圧板設計法が提案された．

このように 4 本杭に支持されたフーチングに脚材をいかり材定着させる方式は確立されたが，設計荷重が小さくなると必要な杭本数が少なくなり，小数本の杭に支持されたフーチングへいかり材定着方式を適用した場合の設計法が必要になった．そこで「送電用鉄塔基礎の多様な要求形態に対応した鉄塔・基礎接合部の耐力設計法に関する研究」が実施され，1,2 および 3 本杭からなるフーチングにいかり材定着させた場合の設計式が確立された．

その他の類似構造物の設計方法としての「風力発電設備支持物構造設計指針・同解説[2007 年版]」（土木学会）では，アンカーボルトを用いた定着方式による設計法が提案されている．「鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼とコンクリートの

複合構造物」(鉄道総合研究所編 平成10年7月)では柱鋼管を杭鋼管に差し込んで定着させるソケット方式の設計法が示されている。いずれの設計法も対象とする断面力は主に曲げモーメントである。

本研究は引揚荷重が卓越した構造物を対象に深礎基礎への定着方式に関する新たな要求に対し、3つの内容に分類して検討したものである。

第一は定着部基礎材の統一に対する要求である。鋼材の価格高騰によるコスト低減の要求を満たすために国外から鉄塔を調達することが求められたが、鉄塔は国内での調達時間に較べて納期が長い。そのため、基礎設計実施前に統一した脚材定着部形状として深礎基礎にいきなり材を定着した方式が求められた。これにより、杭に支持されたフーチングと深礎基礎の両基礎形状に対して基礎形式選定前に脚材を製作することが可能となる。

第二は主鉄筋の定着耐力向上に対する簡易な補強である。送電用鉄塔の引揚脚は引張場へ定着させなければならない。今までの深礎基礎では軸方向主鉄筋のかぶりとしては50cm程度を確保しており、かぶりが大きいため鉄筋の定着破壊は生じなかった。しかし、躯体径を小さくするとかぶりも小さくなり付着破壊が生じる可能性がある。そこで、杭や深礎基礎の軸方向主鉄筋の定着耐力を増加させることが求められた。

第三は定着長の短い支圧板定着方式の高耐力化に関する要求である。深礎基礎の躯体径は3.0m～5.0mを基本として考えられてきたが施工方法の改善により1.0m～2.5mのものも可能となっている。しかし、躯体径が小さいため、必要な定着耐力を確保するためには定着長が長くなる。そこで、定着部の耐力を高めることで、深礎基礎の長さを支圧板の定着長で決定しない設計が求められた。

本研究は、上記で述べた3つの要求に対して、第一に対しては深礎基礎へいきなり材定着方式を適用するための検討、第二に対しては軸方向鉄筋のまわりをスパイラル筋で補強した定着耐力の検討、第三に対しては深礎基礎への支圧板定着方式において鋼管による拘束効果による耐力向上に関する検討、の3点を実施したものである。

本論文は、全6章で構成されており、各章の構成および概要は以下のとおりである。

第1章は序論である。ここでは、本研究の背景、目的について述べ、本論文の構成を示している。

第2章は深礎基礎に埋め込まれたいきなり材の定着耐力について論じている。深礎基礎には支圧板定着方式が適用されてきたが、いきなり材を定着した場合の破壊モードや定着耐力について検討した。支圧板定着方式に較べていきなり材部が剛な構造であること、いきなり材部が脚材の最下部付近に埋め込まれることなどを考慮して、コンクリート躯体に埋め込まれた脚材に関する模型実験を実施した。実験要因としては、脚材の躯体への埋込み長、躯体径などとし、それらの要因が定着

耐力におよぼす影響を検討した。

実験結果から、次を明らかにした。すなわち、(1)いかり材の埋込み深さが大きくなるにつれて定着耐力は大きくなるが、躯体径が大きくなっても耐荷力向上の効果は小さい、(2)いかり材より生じる反力は躯体周辺に配置された鉄筋に向かい、その方向はいかり材の埋込み深さと躯体径の関数で表される、などである。これらから、精度の良い脚材定着耐力算定式を提案した。

第3章は鉄筋の定着耐力向上に対する簡易な補強方法に関して検討している。杭や深礎基礎で躯体径が小さく周囲の鉄筋のかぶりが小さい場合でも、鉄筋の定着破壊が生じないように軸方向主鉄筋の定着耐力の増加が必要となる。しかも、鉄筋は引張場に定着されることとなる。定着長を少しでも短くするために鉄筋のまわりにスパイラル鉄筋を配置することを提案し、実験によりその効果を検討することとした。実験要因としてはスパイラル筋の径や間隔などとした。引張場は、2本の固定鉄筋で固定し中央に配置した1本の鉄筋を引き抜くことでコンクリートの引張状態を再現した。

実験結果から次を明らかにした。すなわち、(1)試験体はスパイラル筋に沿って生じたひび割れが支配的であり、全て脆性的な割裂破壊であった、(2)スパイラル筋の配筋量が大きくなると拘束力が増加して耐力は増加するが、耐力増加の割合は一定値に収束する傾向が見られた、などである。これらの結果から、精度の良いスパイラル筋により補強した軸方向主鉄筋の定着耐力算定式を提案した。

第4章は鋼管に拘束されたコンクリートに埋め込まれた鉄塔脚の定着耐力について論じている。

鋼管内にコンクリートを埋め込んだ構造に対しては圧縮荷重が作用する場合の耐力の向上や水平荷重が作用した場合のじん性能の向上などの研究は行われているが、埋め込まれた脚材を引き抜く研究は見られない。そこで、支圧板定着方式の定着耐力を高める方法として鋼管によって拘束する方式について検討することとし、鋼管内のコンクリート躯体に埋め込まれた鉄塔脚を模した引抜き実験を実施した。

実験結果から次を明らかにした。すなわち、(1)定着長さ部分の鋼管が降伏して最大耐力となる鋼管降伏先行破壊と支圧板周りの脚材が引抜ける付着せん断破壊の2つの破壊モードがある、(2)鋼管降伏モードは支圧板からの伝達力を内圧として作用させ、薄肉円筒理論を適用して構築した式により耐力の算定を行うことができる、(3)付着せん断破壊モードは鋼管によって拘束力が増加し、付着せん断強度は増加する傾向にあり、実験により得られ付着せん断強度を適用することにより耐力を算定することができる。以上により、鋼管降伏モードと付着せん断破壊モードに関して、耐力算定式の提案を行った。

第5章は安全率や適用範囲を明記し、設計式の提案を行った。

第6章は結論であり、本研究を総括した。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 齋藤 修一 印

(2008年 5月8日 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
1.論文	
○論文	齋藤修一, 田邊成, 三島徹也, 鋼管に拘束されたコンクリートに埋め込まれた鉄塔脚の引抜き定着耐力に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.2, pp.313-326, 2007年6月
論文	末永貴志, 田邊成, 齋藤修一, 三島徹也, 鉄塔脚を埋め込んだ鋼管の定着に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.2, pp.889-894, 2003年7月
論文	齋藤修一, 田邊成, 末永貴志, 三島徹也, 鋼管に拘束された鉄塔脚の定着に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.2, pp.853-858, 2003年7月
論文	谷澤史剛, 齋藤修一, 松島学, 関博, コンクリート引張場に定着された鉄筋におけるスパイラル筋の補強効果に関する実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.24, No.2, pp.823-828, 2002年6月
○論文	齋藤修一, 谷澤史剛, 松島学, 関博, 引張場に配置された鉄筋定着へのスパイラル筋による補強効果, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.3, pp.829-834, 2001年7月
○論文	齋藤修一, 石垣洋, 松島学, 関博, 深礎基礎に埋め込まれたアンカーの定着耐力に関する研究, 土木学会論文集, No.648/V-47, pp.33-42, 2000年5月
論文	石垣洋, 齋藤修一, 松島学, 関博, 深礎基礎に埋め込まれたアンカーに関する数値解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.55-60, 1999年6月
論文	齋藤修一, 石垣洋, 関博, 松島学, 深礎基礎に埋め込まれたアンカーの定着耐力に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.3, pp.187-192, 1998年6月
3.講演	
講演	Shuichi Saito, Shigeru Tanabe, Manabu Matsushima, Numerical Analysis of the Uplift Capacity of an Anchor Embedded in a Concrete Column Confined by a Steel Pipe, ICCI2004, The First International Conference on Construction IT, Beijing, CHINA, August 15th - 17th, 2004.8, INNOVATIVE APPLICATION OF INFORMATION TECHNOLOGY IN CONSTRUCTION, pp.491-498
講演	Shuichi Saito, Shigeki Komiyama, Shigeru Tanabe, Manabu Matsushima The tower leg's anchoring capacity embedded in a concrete column surrounded by steel pipe subjected to uplift load, IA-FramCos(International Association of Fracture Mechanics for Concrete Structures, JCI(Japan Concrete Institute), France, 2001.5, Fracture Mechanics of Concrete Structures, pp.1071-1078

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	高橋健一， <u>齋藤修一</u> ，松島学，関博，引張場に定着された鉄筋のスパイラル筋補強効果に関する実験的研究，土木学会第 55 回年次学術講演会，pp.1154-1155，2000 年 9 月
講演	<u>齋藤修一</u> ，松島学，関博，深礎基礎に埋め込まれたアンカーの耐力算定式に関する検討，土木学会第 52 回年次学術講演会，pp.958-959，1997 年 9 月
5.その他	<p><u>齋藤修一</u>，大木正，高橋秀明，河村直明，既設直接基礎のマット補強効果に関する設計モデルの検討，第 62 回年次学術講演会 概要集 第Ⅲ部門，pp.531-532，2007 年 9 月</p> <p><u>齋藤修一</u>，大木正，河村直明，萩原敏行，既設直接基礎のマット補強効果に関する遠心模型実験，第 61 回年次学術講演会 概要集 第Ⅲ部門，pp.817-818，2006 年 9 月</p> <p><u>齋藤修一</u>，飯島政義，末永貴志，杭を有するマット基礎の引抜き・押抜きせん断耐力，第 58 回年次学術講演会 概要集 第Ⅴ部門，pp.545-546，2003 年 9 月</p> <p>田邊成，<u>齋藤修一</u>，三島徹也，安雪暉，送電用鉄塔基礎の 4 本杭支持および直接支持床板における押抜きせん断耐力に関する研究，土木学会論文集，No.739/V-60，pp.1-13，2003 年 8 月</p> <p>田邊成，小宮山茂樹，<u>齋藤修一</u>，三島徹也，送電用鉄塔基礎の 1 本杭支持床板におけるいかり材定着手法に関する研究，土木学会論文集，No.732/V-59，pp.47-62，2003 年 5 月</p> <p><u>齋藤修一</u>，田邊成，末永貴志，三島徹也，マット型基礎へのいかり材定着方式に関する模型実験，土木学会第 57 回年次学術講演会，pp.271-272，2002 年 9 月</p> <p><u>齋藤修一</u>，大浦篤，小宮山茂樹，三島徹也，松島学，コンクリート杭にアンカーボルト定着した送電用鉄塔基礎の模型引抜き載荷実験，土木学会第 55 回年次学術講演会，pp.1136-1137，2000 年 9 月</p> <p>大浦篤，小宮山茂樹，<u>齋藤修一</u>，三島徹也，松島学，床板にアンカーボルト定着した送電用鉄塔基礎の模型引抜き載荷実験，土木学会第 55 回年次学術講演会，pp.1138-1139，2000 年 9 月</p> <p>小原孝之，山本晴人，<u>齋藤修一</u>，松島学，大浦篤，アンカー孔壁面を目荒らし処理した無収縮モルタル接着系あと施工アンカーの付着強度に関する実験的検討，土木学会第 55 回年次学術講演会，pp.1142-1143，2000 年 9 月</p>

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
5.その他	<p><u>齋藤修一</u>，小宮山茂樹，安雪暉，松島学，1本杭フーチングに埋め込まれた鉄塔脚の定着手法に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22,No.3，pp.679-684，2000年6月</p> <p>X.An, K.Maekawa, S. Tanabe, <u>S. Saito</u>, 3D FEM Analysis of Pulling Out Shear Fracture Behavior for RC Slab Footing Supported by Piles, International Workshop on Punching Shear Capacity of RC Slabs-Proceedings, 2000.6, pp.57-64</p> <p>浜西豊，田邊成，小宮山茂樹，<u>齋藤修一</u>，送電用鉄塔基礎における支圧板定着耐力算定式の検討，土木学会第54回年次学術講演会，pp.784-785，1999年9月</p> <p>安雪暉，<u>齋藤修一</u>，松島学，小宮山茂樹，1本杭に支持されたフーチングの引き抜き挙動に関する有限要素解析，土木学会第54回年次学術講演会，pp.546-547，1999年9月</p> <p><u>齋藤修一</u>，松島学，小宮山茂樹，大浦篤，三島徹也，1本杭に支持されたフーチングの引き抜き載荷実験，土木学会第54回年次学術講演会，pp.540-541，1999年9月</p> <p>吉井幸雄，飯島政義，<u>齋藤修一</u>，松島学，送電用鉄塔基礎の支圧板方式による脚材定着手法に関する実験的研究，土木学会論文集，No.606/V-41，pp.129-140，1998年11月</p> <p>吉井幸雄，飯島政義，<u>齋藤修一</u>，松島学，送電用鉄塔基礎の支圧板方式による脚材定着手法に関する解析的研究，土木学会論文集，No.606/V-41，pp.141-149，1998年11月</p> <p><u>齋藤修一</u>，安雪暉，松島学，大浦篤，直接基礎に埋め込まれたアンカーの押抜きせん断耐力，土木学会第53回年次学術講演会，pp.1076-1077，1998年9月</p> <p>Yukio Yoshii, Masayoshi Iijima, Shigeki Komiyama, <u>Shuichi Saito</u>, Manabu Matsushima, FINITE ELEMENT ANALYSIS OF ANCHORAGE PERFORMANCE OF PIPE EMBEDDED IN THE CAISSON TYPE FOUNDATION SUBJECTED TO UPLIFT LOAD, IA-FraMCos(International Association of Fracture Mechanics for Concrete Structures, JCI(Japan Concrete Institute), Fracture Mechanics of Concrete Structures, Volume II, 1998.5, pp.1331-1340</p> <p>飯島政義，<u>齋藤修一</u>，三島徹也，大型送電用鉄塔基礎の合理的な脚材定着設計法に関する考察，電力土木 No.272，pp.23-28，1997年11月</p> <p><u>齋藤修一</u>，飯島政義，三島徹也，支圧板付き鋼管の深礎基礎への定着に関する数値解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18,No.2，pp.455-460，1996年6月</p>